文章编号:1005-0523(2026)05-0023-10

爆炸荷载下CFRP加固混凝土子结构抗连续倒塌性能评价

蒋 认[1,2],彭楚凡[1],陈祺涛[1]

(1. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013; 2. 天津大学建筑工程学院,天津 300354)

摘要:爆炸荷载下关键构件的损伤破坏易引发建筑结构连续倒塌,造成财产损失的同时会危及人民生命安全。现常采用纤维增强复合材料(FRP)来加固钢筋混凝土(RC)结构,但缺乏FRP加固对RC结构抗爆炸倒塌性能退化定量评价的研究。考虑到爆炸试验安全性差和费用高,本文通过LS-DYNA软件利用落锤试验机配合橡胶垫块模拟爆炸荷载对混凝土子结构进行连续倒塌分析,建立了在落锤冲击速度1~10 m/s范围内预测结构表面冲击力和持时(模拟爆炸荷载)的经验公式。基于已有文献数据验证了建立的混凝土子结构数值模型的正确性,采用能量法评价了碳纤维增强复合材料(CFRP)加固对混凝土子结构抗爆炸倒塌性能的贡献。研究结果表明:与未加固混凝土子结构相比,CFRP加固对混凝土子结构剪切模型和弯曲模型抗爆炸倒塌的贡献分别为0.383和0.409。同时,爆炸荷载下CFRP加固梁能显著提高RC子结构在压拱阶段的峰值承载力,为CFRP加固工程结构抗爆设计提供了数据支撑。

关键词:爆炸荷载;橡胶垫块;混凝土子结构;精细化数值模型;连续倒塌

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A

本文引用格式:蒋认,彭楚凡,陈祺涛. 爆炸荷载下CFRP加固混凝土子结构抗连续倒塌性能评价[J]. 华东交通大学学报,2026,43(5):23-32.

Assessment of Progressive Collapse Resistance Performance of CFRP Reinforced Concrete Substructures Under Explosion Loads

Jiang Ren[1,2], Peng Chufan[1], Chen Qitao[1]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: The damage of key components under blast loads can easily lead to the progressive collapse of building structures, causing property losses and endangering people's lives and safety. Fiber reinforced polymer (FRP) materials are commonly used to enhance reinforced concrete (RC) structures, but there is a lack of quantitative assessment of the contribution of FRP-wrapped RC structures to blast-induced progressive collapse resistance. Considering the poor safety and high cost of explosion tests, this study employs a drop hammer test machine with rubber pads to simulate explosion loads on concrete substructures for progressive collapse analysis using the LS-DYNA software platform. An empirical formula was developed to predict surface explosion loads within the drop hammer impact velocity range from 1 to 10 m/s. The correctness of the established numerical model for

收稿日期:2025-09-16
基金项目:江西省自然科学基金项目(20242BAB25307)

the concrete substructure was verified based on existing literature data, and the contribution of CFRP-wrapped to the explosion-resistant collapse performance of the concrete substructure was quantitatively evaluated using the energy method. The research results indicate that, compared to the unreinforced concrete substructure, the contribution of CFRP-wrapped concrete structures to the shear model and bending model were 0.383 and 0.409, respectively. At the same time, CFRP reinforced beams can significantly improve the peak capacity of RC substructures in the compression arch action stage under explosive loads, which will provide data support for the blast resistant design of CFRP-wrapped engineering structures.

Key words: blast load; rubber pad; concrete substructure; refined numerical model; progressive collapse

Citation format: Jiang Ren, Peng Chufan, Chen Qitao. Assessment of progressive collapse resistance performance of CFRP reinforced concrete substructures under explosion loads[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2026, 43(5): 23−32.

近年来，世界范围内因战争和恐怖袭击引起的爆炸造成了大量人员伤亡和财产损失。爆炸产生的冲击波会进一步引起爆源附近建筑结构发生不同程度的损伤和倒塌破坏。虽然我国对炸药使用实行严格管制，但生产生活中爆炸引起的建筑结构连续倒塌事件时有发生。爆炸不仅会引起结构不同程度的损伤，还可能会引发建筑结构连续倒塌，危及人民生命的同时会对社会造成灾难性的影响。

纤维增强复合材料（fiber reinforced polymer，FRP）因其具有强度高和质量轻及施工速度快等优点而深受国内外学者的青睐。国内外学者在FRP加固钢筋混凝土（reinforced concrete，RC）构件抗爆领域取得了丰硕的成果[1-2]。Crawford等[3]对未加固柱和FRP加固柱进行野外爆炸试验，研究显示爆炸后未加固底层柱发生了斜剪破坏，然而在相同的爆炸荷载下碳纤维增强复合材料（carbon fiber reinforced polymer，CFRP）加固后柱未发生剪切破坏且柱跨中的变形显著降低。Lee等[4-5]对1根未加固柱和8根FRP加固柱进行爆炸试验，结果表明未加固柱出现典型的剪切破坏而CFRP加固柱表现出弯曲破坏，同时在相同爆炸荷载下加固柱表现出更好的抗爆性能。Hu等[6]对RC柱进行近距离爆炸试验，研究了柱轴压比和CFRP厚度等对爆炸后RC柱剩余承载力的影响，并利用爆炸后RC柱剩余轴向承载力建立了抗爆加固的预测公式。另外，有学者[7-9]在不考虑轴压比的条件下进行FRP加固RC柱的爆炸试验，进一步揭示了爆炸后RC柱的损伤破坏形态和动力响应行为。上述FRP抗爆加固RC构件的研究发现，国内外学者对FRP种类和加固方式等在爆炸荷载下RC柱的动态响应行为和损伤破坏形态进行了深入研究，然而对FRP加固结构抗爆性能的研究相对匮乏。

国内外学者在爆炸荷载下FRP加固RC结构抗爆性能方面的研究还处于初步阶段。潘金龙等[10]对RC圆柱采用不同的CFRP加固方式来研究其抗爆性能。Li等[11]通过建立精细化数值有限元模型来模拟FRP加固RC柱的抗爆性能，较好地捕捉到FRP的断裂破坏和爆炸荷载下RC柱承载力的退化过程。Elsanadedy等[12]分析了CFRP加固RC圆柱在不同爆炸荷载下的动力行为。通过总结FRP抗爆加固RC构件的研究发现，在实际工程结构中RC结构抗爆炸倒塌分析不应把构件从结构体系中孤立出来，仅通过构件层次的损伤破坏来进行结构层面的抗爆炸连续倒塌分析。因此，有必要进一步研究爆炸荷载下FRP加固RC结构关键构件对相邻构件损伤破坏的影响。Crawford等[13]对四层RC框架结构进行野外爆炸试验，爆炸后柱发生损伤破坏的同时与失效柱相连的梁也发生混凝土的剥落，但框架结构未发生倒塌。然而，在相同爆炸荷载下通过对RC框架结构柱采用CFRP加固来进行抗爆研究，研究结果表明CFRP加固后柱未发生严重破坏且与柱相邻构件未见明显破坏，证实了采用CFRP加固能有效防止结构柱发生脆性破坏且有助于提高结构柱的抗爆性能。Shin等[14]研究了FRP加固RC框架结构的抗倒塌性能，结果表明FRP加固后的RC